PEMODELAN BENDA UJI BALOK KAYU LAMINASI KOMPOSIT DUREN-SENGON

Ratna Widyawati[1]

Abstract

Structural modeling nowadays is mostly done on the testing in the laboratory because they viewed the results are very helpful in the field of research, design and scientific development. Modeling the structure of many done in making samples for the very complex structure, both in geometry and structure of the boundary conditions. Modelling composite wood beam specimen duren-sengon is to make laminated wood beam specimen (glulam beam) using a scale model, because all this research on laminated wood beams (glulam beam) always use the test object prototype. In this paper we will discuss about how to calculate scale model of laminated wood beams so that the behavior of the model scale specimens will be made in accordance with the behavior of a prototype test object. The steps of the test object modeling of composite laminated wood beams duren-sengon is to create model structures using the True Model. Because of the True Model similarity met all the requirements or have complete similarity. There are 10 (ten) types of physical variables involved in the modeling calculations include loads (F), span (l), deflection (δ), moment of inertia (I), stiffness (K), modulus of elasticity (E), stress (σ) , bending moment (M), beam width (b) and high beam (h). Specified length of span (l) and modulus of elasticity (E) as independent variable. The calculation of test object modeling laminated wood beams produced eight formulations that can be used to make a scale model test object. Eight formulations can be used to calculate the value of the load (F), deflection (δ), moment of inertia (I), stiffness (K), stress (σ), bending moment (M), beam width (b) and high beam (h) of the test object model scale to be made, by first setting the value for the long span (l) and modulus of elasticity (E) as independent variables.

Keywords *: modeling, true models, scale models, prototypes*

Abstrak

Pengujian model di bidang struktur atau pemodelan struktur (structural modelling) dewasa ini banyak dilakukan pada pelaksanaan pengujian di laboratorium karena dipandang hasilnya sangat membantu dalam bidang riset, perancangan maupun pengembangan keilmuan. Pemodelan struktur banyak dilakukan dalam pembuatan benda uji untuk kondisi struktur yang sangat kompleks, baik secara geometri struktur maupun kondisi batasnya. Pemodelan benda uji balok kayu komposit duren-sengon ini adalah untuk membuat benda uji balok kayu laminasi (glulam beam) menggunakan skala model, karena selama ini penelitian mengenai balok kayu laminasi (glulam beam) selalu menggunakan benda uji prototype. Dalam tulisan ini akan dibahas mengenai cara perhitungan skala model balok kayu laminasi sehingga perilaku benda uji skala model yang akan dibuat sesuai dengan perilaku benda uji prototype. Langkah-langkah pemodelan benda uji balok kayu laminasi komposit duren-sengon adalah dengan membuat model struktur menggunakan True Model. Karena pada True Model persyaratan similaritas dipenuhi semuanya atau memiliki complete similarity. Terdapat 10 (sepuluh) jenis variabel fisik yang terlibat dalam penghitungan pemodelan meliputi beban (**F**), bentang (**ℓ**), lendutan (**δ**), momen inersia (**I**), kekakuan (**K**), modulus elastisitas (**E**), tegangan (**σ**), momen lentur (**M**), lebar balok (**b**) dan tinggi balok (**h**). Ditentukan panjang bentang (**ℓ**) dan modulus elastisitas (**E**) sebagai variabel independent.Perhitungan pemodelan benda uji balok kayu laminasi menghasilkan delapan

---

[1] Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung
Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No 1 Gedong Meneng, Bandar Lampung

formulasi yang dapat digunakan untuk membuat benda uji skala model. Delapan formulasi tersebut dapat dipergunakan untuk menghitung nilai beban (**F**), lendutan (**δ**), momen inersia (**I**), kekakuan (**K**), tegangan (**σ**), momen lentur (**M**), lebar balok (**b**) dan tinggi balok (**h)** dari benda uji skala model yang akan dibuat, dengan terlebih dahulu menetapkan besaran nilai untuk panjang bentang (**ℓ**) dan modulus elastisitas (**E**) sebagai variabel independent.

Kata kunci : pemodelan, true model, skala model, prototype

I. PENDAHULUAN

Pengujian model di bidang struktur atau pemodelan struktur *(structural modelling)* dewasa ini banyak dilakukan pada pelaksanaan pengujian di laboratorium karena dipandang hasilnya sangat membantu dalam bidang riset, perancangan maupun pengembangan keilmuan. Pemodelan struktur banyak dilakukan dalam pembuatan benda uji untuk kondisi struktur yang sangat kompleks, baik secara geometri struktur maupun kondisi batasnya. Dalam bidang riset, dengan model test bisa dikembangkan suatu teori (baru), pengembangan model matematik untuk metode analitik dan pengembangan suatu formulasi yang sederhana untuk keperluan perancangan. Dalam bidang perancangan, bisa dilakukan *checking* pada hasil analisis yang diperoleh dari metode analitik maupun numerik, dan membuat perancangan suatu struktur yang secara geometri maupun kondisi batasnya sangat kompleks. Dua hal yang harus diketahui sebelum membuat atau melakukan *experimental work*, adalah teori model struktur dan teknik-teknik eksperimental. Di samping itu kita dituntut untuk betul-betul memahami persoalan yang dihadapi. Salah satu hal lain yang perlu dicatat adalah bahwa dalam *structural modelling*, distribusi tegangan pada model/struktur dapat diketahui dengan pengukuran regangannya, sehingga peranan alat ukur regangan menjadi sangat penting pula. Pemodelan benda uji balok kayu komposit duren-sengon ini adalah untuk membuat benda uji balok kayu laminasi *(glulam beam)* menggunakan skala model, karena selama ini penelitian mengenai balok kayu laminasi *(glulam beam)* selalu menggunakan benda uji *prototype*. Dalam tulisan ini akan dibahas mengenai cara perhitungan skala model balok kayu laminasi sehingga perilaku benda uji skala model yang akan dibuat sesuai dengan perilaku benda uji *prototype*.

II. DASAR TEORI PEMODELAN

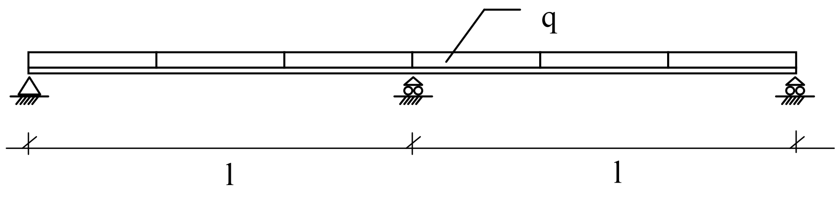
Berdasarkan pada hal-hal yang diharapkan akan diperoleh dari hasil eksperimen, **Suhendro** (1991) mengklasifikasikan model struktur menjadi : (1) *Elastic Model*, (2) *Indirect Model*, (3) *Direct Model*, (4) *Strength Model* dan (5) *Wind Effect Model.*

Elastic Model dipakai untuk mempelajari respon elastik dari suatu struktur. Dengan demikian model tipe ini tidak bisa dipakai untuk memperoleh respon inelastik struktur tersebut. Pada tipe ini, geometri dari model harus mirip *(similar)* dengan geometri dari struktur aslinya *(prototype)*, namun bahan yang dipakai untuk membuat model tidak harus sama dengan bahan pada *prototype*-nya. Yang penting disini bahan model tersebut harus homogen dan elastik. *Indirect Model* merupakan bentuk khusus dari elastic model yang dipakai untuk memperoleh diagram pengaruh *(influence diagram)* reaksi dan gaya-gaya dalam (momen, gaya lintang, gaya aksial). Pembebanan pada model tidak ada hubungannya dengan pembebanan pada prototype-nya, karena efek beban dapat diperoleh dengan mensuperposisikan nilai-nilai dari diagram pengaruh. Model tipe ini sering kali tidak punya kemiripan langsung dengan *prototype*-nya. Sebagai contoh, suatu portal yang perilakunya tergantung dari harga kekakuan lentur (EI) masing-masing batangnya dapat dibuat *indirect model*-nya dengan hanya menggunakan nilai kekakuan lentur relatifnya.

Dengan demikian, tampang lintang batang yang persegi pada *prototype*-nya dapat diganti dengan tampang lintang batang yang bukan persegi (lingkaran, profil, dsb.) pada modelnya, asal kelakuan lentur relatipnya terpenuhi. Di sini, luas tampang batangnya, walaupun tidak di skala tidak akan mempengaruhi hasilnya.

Pada *direct model*, bentuk geometri dan pembebanan pada model adalah mirip dengan prototype-nya, dan regangan, deformasi, serta tegangan pada model juga mirip dengan *prototype*-nya. Dengan demikian model tipe ini juga merupakan keadaan khusus dari *elastic model*. Pada *strength model*, selain geometri dan pembebanan pada model harus mirip dengan *prototype*-nya, bahan untuk membuat model tersebut juga harus sama dengan bahan pada *prototype*-nya. Dengan demikian, model ini dapat dipakai untuk memperoleh respon struktur sampai dengan keruntuhan struktur tersebut *(inelastic range)*. *Wind effect model* dapat dikelompokan menjadi dua macam yaitu : *shape model* dimana hanya bentuk strukturnya yang dipentingkan, dan *aeroelastic model* dimana di samping bentuk strukturnya, kekakuan strukturnya juga dipentingkan karena tegangan-tegangan di dalam struktur diinginkan untuk diketahui. Setiap model struktur harus dirancang, dibebani dan diinterpretasikan hasil-hasilnya berdasarkan similitude requirement yang memberikan hubungan antara model dengan prototype-nya.

Setiap fenomena fisik di alam ini dapat dinyatakan secara kualitatif dalam *fundamental measures* atau dimensi, yaitu (1) ***force*** (F) atau gaya/massa, (2) ***length*** (L) atau panjang, (3) ***time*** (T) atau waktu, (4) ***temperature*** (t) atau suhu, dan (5) ***electric charge***. Pada bidang mekanika, dimensi yang sering terpakai adalah F dan L saja untuk problem statik, dan F, L, dan T untuk problem dinamik. Pernyataan secara kualitatif dibuat dengan melibatkan jumlah dan satuan standar (kg, cm, detik; kips, inchi, detik, dsb.). Setiap persamaan yang menggambarkan suatu aspek dasar dari fenomena alam harus memiliki homogenitas dimensi, yang berarti persamaan tersebut harus : (1) benar/berlaku untuk setiap satuan standar apapun yang dipakai, dan (2) dimensi yang dimiliki oleh ruas kiri dari persamaan tersebut harus sama dengan dimensi yang dimiliki oleh ruas kanan. Dengan melakukan analisis dimensi, kita bisa mengkombinasikan variabel-variabel sehingga menjadi kelompok-kelompok yang *covenient*, yang disebut *piterms*, dan berakibat tereduksinya jumlah bilangan tak diketahui yang terlibat dalam persoalan tersebut. Misalnya bila diinginkan untuk menentukan tegangan maksimum yang terjadi pada suatu struktur balok menerus yang dibebani dengan beban terbagi rata ***q*** persatuan panjang, seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur balok menerus yang dibebani beban terbagi rata *q*

Tegangan yang terjadi pada suatu tampang lintang balok tersebut, α, akan merupakan fugsi beban dari q, dan panjang $\boldsymbol{\ell}$. Kondisi tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$F(\alpha, q, \boldsymbol{\ell}) = 0 \tag{1}$$

Buckingham (1914) membuktikan bahwa semua persamaan yang berbentuk seperti itu dapat dinyatakan sebagai *a product of powers* dalam bentuk :

$$\alpha = K\ q^{a}\ \boldsymbol{\ell}^{b} \tag{2}$$

Dimana K adalah parameter tidak berdimensi atau konstanta.

Secara dimensional, persamaan (2) tersebut menjadi :

$$\frac{F}{L^2} = \left(\frac{F}{L}\right)^a L^b$$

$$F\ L^{-2} = F^a\ L^{-a+b}$$

Homoginitas dimensi mensyaratkan bahwa eksponen masing-masing dimensi harus sama, sehingga :

A	=	1	$\rightarrow$	F
a + b	=	– 2	$\rightarrow$	L

Di sini diperoleh : a = 1 dan b = –1, sehingga diperoleh :

$$\alpha = K \left(\frac{q}{\ell}\right) \tag{3}$$

K dapat diperoleh dari hasil eksperimen. Perlu dicatat di sini bahwa analisis dimensi menunjukkan bahwa α merupakan fungsi linier dari $\left(\frac{q}{\ell}\right)$. Persamaan (3) dapat ditulis sebagai :

$$G \left(\frac{\alpha\ \ell}{q}\right) = 0 \tag{4}$$

Yang berarti bahwa masalah tersebut diformulasikan dalam suatu *dimensionless ratio* dan *functional* **G** yang belum dketahui.

Solusi secara matematik dari persoalan tersebut adalah :

$$\alpha = \frac{M.c}{I} = \frac{a_1.q.\ell^2.(a.\ell_2)a}{a_3.\ell^4} = \frac{a_1.a_2}{a_3} = \left(\frac{q}{\ell}\right) \tag{5}$$

Dimana a_1, a_2 dan a_3 adalah konstanta yang besarnya tergantung dari geometri strukturnya, yang tecakup kesemuanya di dalam konstanta K pada persamaan (3). Perlu dicatat bahwa hanya dengan analisis dimensi saja, kita tidak bisa menetapkan konstanta K (atau a_1, a_2 dan a_3) tersebut. ***Buckingham's Pi Theorem*** mengatakan bahwa setiap persamaan yang dimensinya homogen yang melibatkan besaran-besaran fisik tertentu dapat direduksi menjadi suatu persamaan ekuivalen yang melibatkan satu set lengkap produk-produk tidak berdimensi.

Secara umum, teori tersebut menyatakan bahwa persamaan :

$$F\ (X_1,\ X_2,\ .....,\ X_n) = 0 \tag{6}$$

Dapat diekspresikan secara ekuivalen dalam bentuk :

$$G\ \ (\pi_1,\ \pi_2,\ .....,\ \pi_m) = 0 \tag{7}$$

$\pi_i\ \ (\boldsymbol{i} = 1,...,\boldsymbol{m})$ = produk-produk tak berdimensi dari variable fisik X_1, X_2, ... X_n.
Banyaknya produk tidak berdimensi ***(m)*** adalah sama dengan banyaknya variabel fisik ***(n)*** dikurangi dengan banyaknya dimensi yang terlibat dalam masalah tersebut ***(r)***. Kalau

kita kaitkan dengan balok menerus di atas, maka n = 3 (yaitu α, q, l); r = 2 (yaitu F dan L); sehingga $m = n - r$ = 3 – 2 = 1 (yaitu $\left(\frac{\alpha\ \ell}{q}\right)$.

Untuk menentukan lendutan maksimum (respon elastik) pada balok baja yang dibebani secara dinamik dengan beban terbagi merata.

Variabel-variabel fisik yang terlibat meliputi :

$\mathcal{U}$	=	Lendutan	L
$\mathcal{W}$	=	Beban terbagi rata	FL^{-1}
E	=	Modulus elastik	FL^{-2}
T	=	Waktu	T
ρ	=	Berat satuan	FL^{-3}
$\mathcal{G}$	=	Gravitasi	LT^{-2}
I	=	Momen inersia	L^4
$\mathcal{L}$	=	Panjang bentang	L

Persamaan (6) dapat ditulis :

$$F\ (u,\ E,\ \ell,\ t,\ w,\ \rho,\ g,\ I\ ) = 0$$

atau

$$u = F^1(,\ E,\ \ell,\ t,\ w,\ \rho,\ g,\ I\ )$$

Untuk memperoleh π term persamaan di atas ditulis :

$$u = C\ .E^a.\ell^b.t^c.w^d.\rho^e.g^f.I^h \qquad (8)$$

Secara dimensional :

$$F^0.L^1.T^0 = (F.L^{-2})^a.(L)^b.(T)^c.(F.L^{-1})^d.(F.L^{-3})^e.(L.T^{-2})^f.(L^4)^h$$

$$F^0.L^1.T^0 = F^{(a+d+e)}.(L)^b.L^{(-2a+b-d-3e+f+4h)}.T^{(c-2f)}$$

Sehingga :

F : $a + d + e = 0$
L : $-2a + b - d - 3e + f + 4h$
T : $c - 2f$

Secara matriks :

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ -2 & 1 & 0 & -1 & -3 & 1 & 4 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Disini n = 8, r = 3, sehingga $m = n - r$ = 8 – 3 = 5.
Dipilih 3 variabel yang *independent* → determinan-nya harus ≠ 0

Coba memilih b, d dan e

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -3 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 0 \rightarrow \text{tidak memenuhi } (\textit{dependent})$$

Coba memilih b, e dan f

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & -2 \\ 1 & -3 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \neq 0 \rightarrow \text{memenuhi } (\textit{dependent}).$$

Variabel-variabel *b, e, f* dapat dinyatakan dalam variabel lain.

$$f = \frac{c}{2}$$

$$e = -a - d$$

$$e = 1 - a - 2d - \frac{c}{2} - 4\boldsymbol{r} \qquad (8)$$

Dari persamaan (8) dan (9) diperoleh :

$$\boldsymbol{u} = C \;.\; E^{a} . \boldsymbol{\ell}^{1\text{-}a\text{-}2d\text{-}\frac{c}{2}-4\boldsymbol{r}} . \; t^{c} . \; \boldsymbol{w}^{d} . \; \rho^{-a-d} . \; \boldsymbol{g}^{\frac{c}{2}} . \; I^{\boldsymbol{r}}$$

$$\boldsymbol{u} = C \;.\; \boldsymbol{\ell} \left(\frac{E}{\rho.\boldsymbol{\ell}}\right)^{a} . \left(t\sqrt{\frac{\boldsymbol{g}}{\boldsymbol{\ell}}}\right)^{c} . \left(\frac{\boldsymbol{w}}{\rho.\boldsymbol{\ell}^{2}}\right)^{d} . \left(\frac{I}{\boldsymbol{\ell}^{4}}\right)^{\boldsymbol{r}}$$

$$\left(\frac{\boldsymbol{u}}{\boldsymbol{\ell}}\right) = C \;.\; \left(\frac{E}{\rho.\boldsymbol{\ell}}\right)^{a} . \left(t\sqrt{\frac{\boldsymbol{g}}{\boldsymbol{\ell}}}\right)^{c} . \left(\frac{\boldsymbol{w}}{\rho.\boldsymbol{\ell}^{2}}\right)^{d} . \left(\frac{I}{\boldsymbol{\ell}^{4}}\right)^{\boldsymbol{r}}$$

$$\Pi_{\boldsymbol{1}} = C \;.\; \Pi_{2}^{\;a} . \; \Pi_{3}^{\;c} . \; \Pi_{4}^{\;d} . \; \Pi_{5}^{\;\boldsymbol{r}}$$

Pada proses di atas, akhirnya kita memperoleh persamaan dengan variabel yang tidak berdimensi ($\Pi_1, \Pi_2, \ldots, \Pi_5$).

Prinsip-prinsip analisis dimensi yang telah diuraikan di atas dengan mudah bisa dipakai pada pembuatan model struktur. Secara umum, model struktur dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu (1) *True model*, (b) *Adequate model* dan (c) *Distorted model*. Pada *True model*, persyaratan similaritas dipenuhi semuanya. Karena itu model jenis ini disebut juga model yang memiliki *complete similarity*.

Berdasarkan *Teori Buckingham*, setiap fenomena fisik dapat dinyatakan dalam :

$$\Pi_1 = \phi(\Pi_2, \Pi_3, \ldots, \Pi_n) \qquad (10)$$

Bila persamaan di atas ditulis untuk prototype dan untuk modelnya, maka diperoleh hubungan :

$$\frac{\Pi_{1\boldsymbol{p}}}{\Pi_{1\boldsymbol{m}}} = \frac{F_{\boldsymbol{p}}\left(\Pi_{2\boldsymbol{p}}, \Pi_{3\boldsymbol{p}}, \ldots, \Pi_{n\boldsymbol{p}}\right)}{F_{\boldsymbol{m}}\left(\Pi_{2\boldsymbol{m}}, \Pi_{3\boldsymbol{m}}, \ldots, \Pi_{n\boldsymbol{m}}\right)} \qquad (11)$$

Dimana :

$\Pi_{1p} \rightarrow \Pi_1$ pada *prototype*

$\Pi_{1m} \rightarrow \Pi_1$ pada model

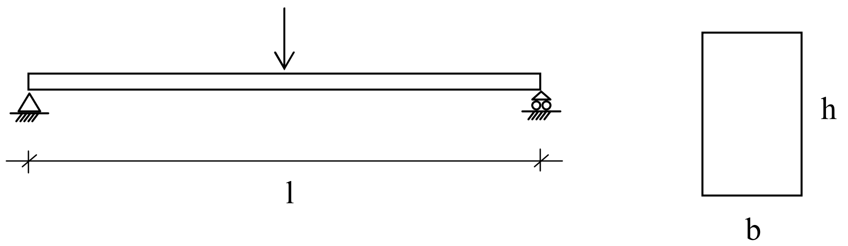
Complete similarity yang dimaksud bahwa :

$$\begin{aligned} &\Pi_{2p} \rightarrow \Pi_{1m} \\ &\Pi_{2p} \rightarrow \Pi_{1m} \\ &. \\ &. \\ &. \\ &\Pi_{np} \rightarrow \Pi_{nm} \end{aligned} \qquad (12)$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} &F_p = F_m \\ &\Pi_{1p} = \Pi_{1m} \end{aligned} \qquad (13)$$

Persamaan (12) dan (13) merupakan dasar dari pembuatan model. Hubungan antara model dengan *prototype*-nya yang dinyatakan pada persamaan (12) disebut kondisi-kondisi perancangan dan operasi *(the design and operating condition)*. Bila diinginkan membuat suatu model untuk mengetahui nilai kekakuan dari suatu balok sederhana yang bertampang empat persegi panjang.



Gambar 2. Struktur balok sederhana yang bertampang persegi empat

	Variabel yang terlibat	**Dimensi**	**F**	**L**
K	Kekakuan	$F.L^{-1}$	1	−1
$\mathscr{L}$	Bentang	L	0	1
B	lebar Balok	L	0	1
H	tinggi balok	L	0	1
E	modulus elastik	$F.L^{-2}$	1	−2
G	modulus geser	$F.L^{-2}$	1	−2

Karena $r = 2$ (statik) yaitu F dan L, dipilih 2 variabel *independent* $\rightarrow \ell$ dan E

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -2 \end{vmatrix} \neq 0 \rightarrow \text{ ok}$$

$$K = C \;.\; \ell^a \;.b^c \;.\; h^d \;.\; E^e \;.\; G^f$$

Secara dimensional :

$$F^1.L^{-1}.T^0 = L^a \ . \ L^c \ . \ L^d \ . \ (F.L^{-2})^e \ . \ (F.L^{-2})^f$$

$$F^1.L^{-1}.T^0 = F^{(e+f)} \ . \ L^{(a+c+d-2e-2f)} \ . \ T^0$$

Sehingga :

$e + f = 1$

$a + c + d - 2e - 2f = -1$

Karena dipilih ℓ dan E sebagai variabel *independent*, maka :

$e = (1 - f)$

$a = -1 - c - d + 2 - 2f - 2f = (1 - c - d - 4f)$

Sehingga :

$$K = C \ . \ \ell^{(1\text{-}c\text{-}d\text{-}4f)} \ .b^c \ . \ h^d \ . \ E^{(1\text{-}f)} \ . \ G^f$$

$$K = C \ . \ \ell \ . \left(\frac{b}{\ell}\right)^c . \left(\frac{h}{\ell}\right)^d . \left(\frac{G}{E}\right)^f . \ (E)$$

$$\left(\frac{K}{E.\ell}\right) = C \ . \left(\frac{b}{\ell}\right)^c . \left(\frac{h}{\ell}\right)^d . \left(\frac{G}{E}\right)^f$$

$$\Pi_1 = C \ . \ \Pi_2{}^c.\Pi_3{}^d.\Pi_4{}^f$$

Dimana :

$\Pi_1 = \dfrac{K}{E.\ell}$; $\Pi_3 = \dfrac{h}{\ell}$

$\Pi_2 = \dfrac{b}{\ell}$; $\Pi_4 = \dfrac{G}{E}$

Persyaratan *complete similarity* :

$$\Pi_{2p} = \Pi_{2m} \quad \rightarrow \quad \frac{b_p}{\ell_p} = \frac{b_m}{\ell_m} \quad \rightarrow \quad b_m = \left(\frac{\ell_m}{\ell_p}\right) b_p$$

Bila skala panjang antara model dan *prototype* diberi notasi S_ℓ, maka :

$$S_\ell = \left(\frac{\ell_p}{\ell_m}\right)$$

Maka :

$$\Pi_{2p} = \Pi_{2m} \quad \rightarrow \quad \frac{b_p}{\ell_p} = \frac{b_m}{\ell_m} \quad \rightarrow \quad b_m = \frac{1}{S_\ell}.b_p \qquad (14)$$

$$\Pi_{3p} = \Pi_{3m} \quad \rightarrow \quad \frac{h_p}{\ell_p} = \frac{h_m}{\ell_m} \quad \rightarrow \quad b_m = \frac{1}{S_\ell}.h_p \qquad (15)$$

$$\Pi_{4p} = \Pi_{4m} \quad \rightarrow \quad \frac{G_p}{E_p} = \frac{G_m}{E_m} \quad \rightarrow \quad G_m = \left(\frac{E_m}{E_p}\right) G_p$$

Bila skala modulus elastik antara model dan *prototype* diberi notasi S_E, maka :

$$S_E = \left(\frac{E_p}{E_m}\right)$$

Maka :

$$\Pi_{4p} = \Pi_{4m} \quad \rightarrow \quad \frac{G_p}{E_p} = \frac{G_m}{E_m} \quad \rightarrow \quad G_m = \frac{1}{S_E} \cdot G_p \tag{16}$$

Bila persamaan (14), (15) dan (16) dipenuhi semua pada modelnya, maka nilai kekakuan pada model dan *prototype* mempunyai hubungan :

$$\Pi_{1p} = \Pi_{1m} \quad \rightarrow \quad \frac{K_p}{E_p.\ell_p} = \frac{K_m}{E_m.\ell_m}$$

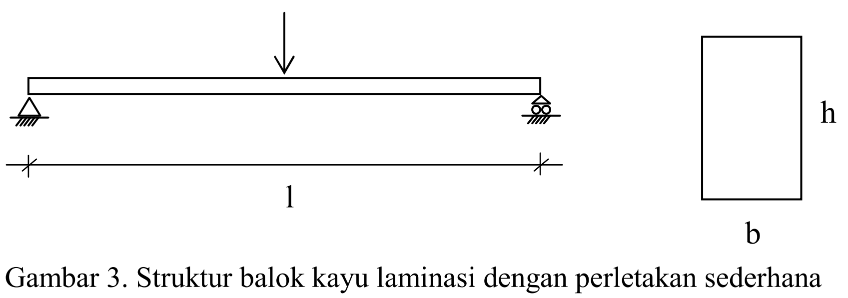
$$K_p = \frac{E_m}{E_p} \cdot \frac{\ell_p}{\ell_m}.K_m$$

$$K_p = S_E.S_\ell.K_m$$

Pada *Adequate model*, hanya *the first order similarity* yang dipenuhi oleh model, sedang *second order similarity* tidak dipenuhi. Namun karena pengaruh *the second order terms* relatif sangat kecil, maka hasil eksperimennya cukup akurat. Pada balok portal, pengaruh deformasi geser dan deformasi aksial dapat diabaikan, karena pada persoalan ini yang dominan adala pengaruh deformasi lentur. Dengan kata lain, momen lentur adalah *the first order* dan gaya geser dan aksial adalah *the second order*. Pada *Distorted model*, salah satu atau lebih variabel yang termasuk *the first order*, persyaraan *similitude*-nya tidak dipenuhi. Model jenis ini tidak disarankan dipakai.

III. PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Benda uji balok kayu laminasi komposit duren-sengon akan dibuat model struktur dengan menggunakan *True Model*. Pada *True model*, persyaratan similaritas dipenuhi semuanya. Karena itu model jenis ini disebut juga model yang memiliki *complete similarity*. Adapun langkah-langkah perhitungan untuk pemodelan diuraikan sebagai berikut.



Gambar 3. Struktur balok kayu laminasi dengan perletakan sederhana

Variabel fisik yang terlibat meliputi :

	Variabel yang terlibat	**Dimensi**	**F**	**L**
P	Beban	F	1	0
$\mathcal{L}$	Panjang bentang	L	0	1
δ	Lendutan	L	0	1
I	Inersia	L^4	0	4

K	Kekakuan	FL^{-1}	1	–1
E	Modulus Elastisitas	FL^{-2}	1	–2
σ	Tegangan	FL^{-2}	1	–2
M	Momen Lentur	FL	1	1
B	Lebar balok	L	0	1
H	Tinggi balok	L	0	1

$n = 10$; $m = n - r = 10 - 2 = 8$ *piterms*

Karena $r = 2$ (statik) yaitu F dan L, dipilih 2 variabel *independent* $\rightarrow \ell$ dan E

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -2 \end{vmatrix} \neq 0 \rightarrow \text{ ok}$$

$$\delta = C \ . \ P^{a} \ . \ \ell^{c} \ . \ I^{d} \ . \ K^{e} \ . \ E^{e} \ . \ G^{f}$$

Secara dimensional :

$$F^{0}.L^{1}.T^{0} = (F)^{a} \ . \ (L)^{c} \ . \ (L^{4})^{d} \ . \ (F.L^{-1})^{e} \ . \ (F.L^{-2})^{f} \ . \ (F.L^{-2})^{g} \ . \ (F.L)^{h} \ . \ (L)^{i} \ . \ (L)^{j}$$

$$F^{0}.L^{1}.T^{0} = F^{(a+e+f+g+i)} \ . \ L^{(c+4d-e-2f-2g+i+o)} \ . \ T^{0}$$

Sehingga :

F ; $a + e + f + g + i = 0$

L ; $c + 4d - e - 2f - 2g + i + j + o = 1$

T ; $0 = 0$

Karena dipilih ℓ dan E sebagai variabel *independent*, maka :

$$\begin{aligned} f &= -a - e - g - i \\ c &= 1 - 4d + e + 2f + 2g - i - j - o \\ &= 1 - 4d + e + 2(-a - e - g - i) + 2g - I - j - o \\ &= 1 - 4d + e - 2a - 2e - 2g - 2i + 2g - i - j - o \\ &= 1 - 4d - e - 2a - 3i - j - o \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\delta = C \ . \ P^{a} \ . \ \ell^{(1\text{-}4d\text{-}2a\text{-}e\text{-}3i\text{-}j\text{-}o)} \ .I^{d} \ . \ K^{e} \ . \ E^{(-a\text{-}e\text{-}g\text{-}i)} \ . \ \sigma^{g} \ . \ M^{i} \ . \ B^{j} \ . \ H^{o}$$

$$\delta = C \ . \ \ell \ . \left(\frac{P}{\ell^{2}.E}\right)^{a} . \left(\frac{I}{\ell^{4}}\right)^{d} . \left(\frac{K}{\ell.E}\right)^{e} . \left(\frac{\sigma}{E}\right)^{g} . \left(\frac{M}{\ell^{3}.E}\right)^{i} . \left(\frac{B}{\ell}\right)^{j} . \left(\frac{H}{\ell}\right)^{o} .$$

$$\frac{\delta}{\ell} = C \ . \left(\frac{P}{\ell^{2}.E}\right)^{a} . \left(\frac{I}{\ell^{4}}\right)^{d} . \left(\frac{K}{\ell.E}\right)^{e} . \left(\frac{\sigma}{E}\right)^{g} . \left(\frac{M}{\ell^{3}.E}\right)^{i} . \left(\frac{B}{\ell}\right)^{j} . \left(\frac{H}{\ell}\right)^{o} .$$

$$\Pi_1 = C \ . \ \Pi_2{}^{a}.\Pi_3{}^{d}.\Pi_4{}^{e}.\Pi_5{}^{g}.\Pi_6{}^{i}.\Pi_7{}^{j}.\Pi_8{}^{o}$$

Dimana :

$\Pi_1 = \dfrac{\delta}{\ell}$; $\Pi_5 = \dfrac{\sigma}{E}$

$\Pi_2 = \dfrac{A}{E.\ell^{2}}$; $\Pi_6 = \dfrac{M}{E.\ell^{3}}$

$\Pi_3 = \dfrac{I}{\ell^{4}}$; $\Pi_7 = \dfrac{B}{\ell}$

$$\Pi_4 = \frac{K}{E.\ell} \quad ; \quad \Pi_8 = \frac{H}{\ell}$$

Persyaratan *complete similarity* :

$$\Pi_{1p} = \Pi_{1m} \rightarrow \frac{\delta_p}{\ell_p} = \frac{\delta_m}{\ell_m} \rightarrow \delta_m = \left(\frac{\ell_m}{\ell_p}\right)\delta_p$$

$$\Pi_{2p} = \Pi_{2m} \rightarrow \frac{P_p}{E_p.\ell_p^2} = \frac{P_m}{E_m.\ell_m^2} \rightarrow P_m = \left(\frac{E_m}{E_p}.\frac{\ell_m^2}{\ell_p^2}\right)P_p$$

$$\Pi_{3p} = \Pi_{3m} \rightarrow \frac{I_p}{\ell_p^4} = \frac{I_m}{\ell_m^4} \rightarrow I_m = \left(\frac{\ell_m^4}{\ell_p^4}\right)I_p$$

$$\Pi_{4p} = \Pi_{4m} \rightarrow \frac{K_p}{E_p.\ell_p} = \frac{K_m}{E_m.\ell_m} \rightarrow K_m = \left(\frac{E_m}{E_p}.\frac{\ell_m}{\ell_p}\right)K_p$$

$$\Pi_{5p} = \Pi_{5m} \rightarrow \frac{\sigma_p}{E_p} = \frac{\sigma_m}{E_m} \rightarrow \sigma_m = \left(\frac{E_m}{E_p}\right)\sigma_p$$

$$\Pi_{6p} = \Pi_{6m} \rightarrow \frac{M_p}{E_p.\ell_p^3} = \frac{M_m}{E_m.\ell_m^3} \rightarrow M_m = \left(\frac{E_m}{E_p}.\frac{\ell_m^3}{\ell_p^3}\right)M_p$$

$$\Pi_{7p} = \Pi_{7m} \rightarrow \frac{B_p}{\ell_p} = \frac{B_m}{\ell_m} \rightarrow B_m = \left(\frac{\ell_m}{\ell_p}\right)B_p$$

$$\Pi_{8p} = \Pi_{8m} \rightarrow \frac{H_p}{\ell_p} = \frac{H_m}{\ell_m} \rightarrow H_m = \left(\frac{\ell_m}{\ell_p}\right)H_p$$

Penggunaan formulasi di atas untuk melakukan pemodelan benda uji balok kayu laminasi, dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Pemodelan benda uji balok kayu laminasi

No.	Variabel	Notasi	Satuan	Prototype	Model
1	Beban	P	kg	4500	500
2	***Panjang bentang***	ℓ	***cm***	***210***	***70***
3	Lendutan	δ	cm	2	0,667
4	Inersia	I	cm^4	5384,453	66,475
5	Kekakuan	K	kg/cm	1700	566,667
6	***Modulus Elastisitas***	***E***	***kg/cm^2***	***3900***	***3900***
7	Tegangan	σ	kg/cm^2	450	450
8	Momen Lentur	M	kgcm	225000	833,333
9	Lebar balok	B	cm	7,5	2,5
10	Tinggi balok	H	cm	20,5	6,83

Catatan : Untuk panjang bentang (ℓ) dan modulus elastisitas (E) merupakan *variable independent* (ditetapkan).

Tabel di atas merupakan hasil penggunaan formulasi pemodelan struktur dengan menggunakan *True Model*. Dari tabel tersebut dapat dijelaskan apabila ditetapkan benda uji *prototype* dengan panjang bentang 210 cm maka benda uji modelnya memiliki panjang bentang 70 cm. Dimensi benda uji *prototype* sebesar 7,5 cm x 20,5 cm, dimensi pada benda uji model adalah 2,5 cm x 6,83 cm. Beban yang diprediksikan dapat ditahan benda uji *prototype* sebesar 4500 kg, beban yang mampu ditahan oleh benda uji model sebesar 500 kg. Selanjutnya untuk lendutan, inersia, kekakuan, tegangan dan momen lentur diperoleh melalui perhitungan menggunakan data-data panjang bentang, dimensi dan beban.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan pembahasan di atas dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pemodelan struktur banyak dilakukan dalam pembuatan benda uji untuk kondisi struktur yang sangat kompleks, baik secara geometri struktur maupun kondisi batasnya.
2. Benda uji balok kayu laminasi komposit duren-sengon dibuat model struktur dengan menggunakan *True Model*. Karena pada *True Model* persyaratan similaritas dipenuhi semuanya atau memiliki *complete similarity*.
3. Terdapat 10 (sepuluh) jenis variabel fisik yang terlibat dalam penghitungan pemodelan, dan dipilih panjang bentang (**ℓ**) dan modulus elastisitas (**E**) sebagai variabel *independent*.
4. Perhitungan pemodelan benda uji balok kayu laminasi menghasilkan delapan formulasi yang dapat digunakan untuk membuat benda uji skala model. Delapan formulasi tersebut dapat dipergunakan untuk menghitung nilai beban (**F**), lendutan (**δ**), momen inersia (**I**), kekakuan (**K**), tegangan (**σ**), momen lentur (**M**), lebar balok (**b**) dan tinggi balok (**h)** dari benda uji skala model yang akan dibuat, dengan terlebih dahulu menetapkan besaran nilai untuk panjang bentang (**ℓ**) dan modulus elastisitas (**E**) sebagai variabel *independent*.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim. 1961. *Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia NI-5. 1961.* Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan. Direktorat Jenderal Cipta Karya. Departemen Pekerjaan Umum.

Sasaki, H., McArthur, E., dan Gottstein, J.W. 1973. *Maximum Strenght of End-Grain to End-Grain Butt Joint*. Forest Product Journal, Vol. 23, No. 2, pp 48-54.

Suhendro, B., 1991, Teori Model Struktur dan Teknik Eksperimental, Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik Fakultas Gadjah Mada Yogyakarta.